

КОСМИЧЕСКИЙ ИНФРАКРАСНЫЙ ФОН: КАК ЕГО СМОДЕЛИРОВАТЬ И КАК РАЗОБРАТЬСЯ В ПУТАНИЦЕ

С. В. Пилипенко

Физический институт им. П. Н. Лебедева РАН

Неоднородный космический инфракрасный фон, созданный далекими галактиками, представляет существенную проблему для будущих наблюдений в дальнем ИК диапазоне, на длинах волн 100—1000 мкм. Галактик в этом диапазоне на небе оказывается так много, что разрешения телескопов ближайшего будущего не хватит для наблюдения этих галактик по отдельности. Для борьбы с фоном в будущем необходимо научиться его моделировать, чему и посвящена настоящая лекция.

COSMIC INFRARED BACKGROUND: HOW TO MODEL IT AND HOW TO BEAT THE CONFUSION

S. V. Pilipenko

Lebedev Physical Institute

The inhomogenous infrared background created by distant galaxies poses a serious problem for future observations in the Far InfraRed wavelenght range, on the wavelengths of 100—1000 microns. There are so many galaxies in the sky in this range, so the resolution of the telescopes of the near future will be insufficient to observe all these galaxies separately. In order to beat the effects of background, it is needed to learn how to model it, and this is the subject of the current lecture.

Введение

Наша Вселенная наполнена фоновыми излучениями во всем диапазоне электромагнитного спектра — от радио до гамма. Наибольшей интенсивностью обладает реликтовое излучение, представляющее собой почти идеальное излучение черного тела с температурой 2.73 К. Максимум интенсивности фона приходится на длину волны

около 1 мм. На более коротких волнах, около 0.3 мм, присутствует еще один мощный пик излучения, имеющий другую природу: это инфракрасное (ИК) излучение, созданное пылью.

Основная масса пыли нагревается светом звезд до температуры не более нескольких десятков кельвинов и излучает тепловым образом. Пыль имеется в нашей Галактике, что хорошо известно из наблюдений поглощения света звезд. С развитием внеатмосферной ИК астрономии стало наблюдаться и излучение пыли нашей Галактики. Наиболее подробная карта всего неба в излучении пыли была получена на космическом телескопе Планк [1]. Излучение пыли наиболее сильно в плоскости диска и сильно ослабевает к полюсам Галактики. Но кроме нашей Галактики в ИК-фоне присутствует вклад других галактик.

Суммарное излучение пыли нашей Галактики сравнительно слабое, около 10^{-4} от ее оптической светимости. Есть галактики, в которых пыли так много, что почти все излучение звезд в них перехватывается и переизлучается пылью в дальнем ИК диапазоне. Такие галактики называют субмиллиметровыми, так как их максимум светимости приходится на длины волн меньше миллиметра. В собственной системе излучения галактики максимум приходится на длину волны около 100 мкм, но из-за космологического красного смещения этот максимум смещается в более длинноволновую область.

Сейчас в большинстве окружающих нас галактик пыли сравнительно немного, однако раньше, при возрасте Вселенной в 2–5 млрд лет, слияния галактик происходили гораздо чаще, чем теперь. Это вызывало мощные вспышки звездообразования и появление большого количества пыли. Поэтому в указанный временной период значительная часть галактик были субмиллиметровыми.

Наблюдения на длинах волн 100–300 мкм с поверхности Земли невозможны, наша атмосфера полностью непрозрачна в этом диапазоне. Для исследований в нем необходим телескоп в стратосфере или в космосе. Такие телескопы сильно ограничены в размерах: максимальный диаметр апертуры телескопа в дальнем ИК диапазоне на сегодня составляет 3.5 м у телескопа им. Гершеля, который уже прекратил свою работу. Планируемая космическая обсерватория Миллиметрон будет иметь диаметр главного зеркала 10 м. На длине волны 250 мкм угловое разрешение Гершеля составляло 12 угловых секунд, а у Миллиметрона составит 5 секунд. При максимальной чувствительности Гершеля, достижимой при многочасовом накоплении сигнала, количество субмиллиметровых галактик на небе достигает

10^5 град. $^{-2}$, и в поле зрения в среднем попадает 0.9 галактик. Это означает, что часто в поле зрения находится более одной галактики, и отличить их невозможно. Данная проблема в астрономии носит название проблемы путаницы. Иными словами, изображения, получаемые с Гершеля, содержат неоднородный кашеобразный фон, из которого невозможно выделить слабые точечные источники.

По измерениям Гершеля предел путаницы, т. е. минимальный уровень потока, на котором возможно выделять отдельные источники, составляет 6 мЯн (миллианских) на длине волны 250 мкм. Здесь следует сделать замечание, что это относится лишь к фотометрическим наблюдениям, проводимым в широкой полосе спектра. При наблюдениях спектральных линий такой проблемы не возникает, так как галактики на разных расстояниях обладают разными спектрами за счет разных красных смещений, и можно точно сказать, сколько галактик имеется в данном поле зрения.

Что известно про ИК-фон

Важнейшая характеристика субмиллиметровых галактик — это их количество на единицу площади неба в зависимости от потока (с потоками больше заданного), так называемая «диаграмма $\log N - \log S$ » (рис. 1). Для потоков выше, чем предел путаницы для существующих телескопов, возможно прямое измерение этой зависимости. Для более низких потоков, т. е. для неразрешенных галактик, проводится экстраполяция с учетом того, что суммарный поток с единицы площади неба от неразрешенных и разрешенных источников должен давать средний по небу ИК фон.

Одна из часто применяемых в литературе моделей зависимости числа галактик от потока для разных длин волн приведена в работе [2]. Используя эти зависимости, можно получить простые оценки предела путаницы, оценив поток, при котором одна галактика будет приходиться на площадь неба, в несколько раз большую, чем площадь диаграммы направленности телескопа. Подобные и несколько более сложные оценки приведены в работе [2]. Однако для многих задач, например, для изучения влияния фона на конкретные типы изображений астрономических объектов, проверки работы алгоритмов выделения источников, изучения методов борьбы с пределом путаницы, необходимы карты фона неба.

Простейшую карту неба можно создать, распределив источники по небу случайно и присвоив им потоки в соответствии с диаграммой

$\log N - \log S$. Но при этом не будет информации о расстоянии до галактик, а также на карте не будет проявляться крупномасштабная структура Вселенной. По данным измерений анизотропии ИК-фона на телескопах Гершель и Планк [3, 4], фон показывает значительные отклонения от случайного распределения. Поэтому для задач, выходящих за рамки простых оценок, необходимо создавать более сложную модель фона.

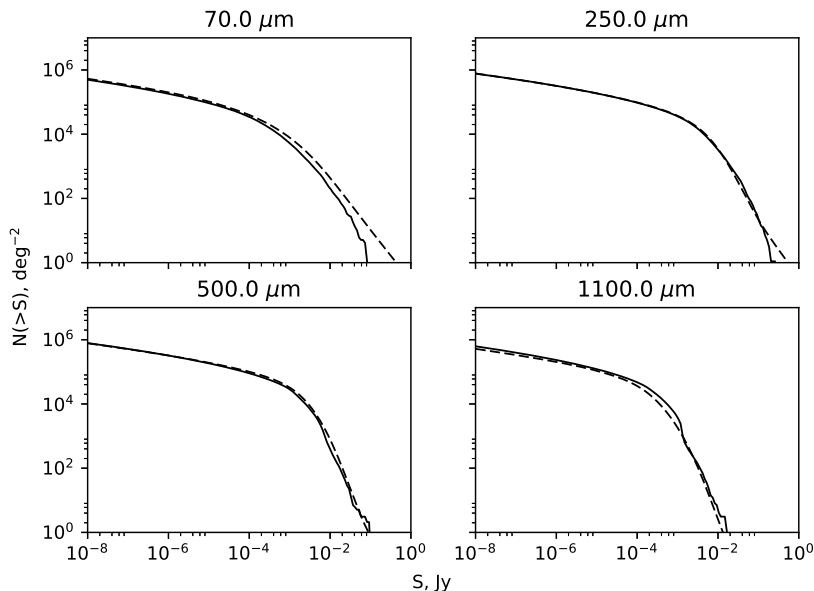


Рис. 1. Подсчеты источников в четырех диапазонах (диаграмма $\log N - \log S$). Сплошные линии — наша модель [5], штриховые — аппроксимация реальных данных из работы [2]

Космологический подход к моделированию фона

Современная космологическая модель предсказывает статистические характеристики распределения материи во Вселенной. На основе этих предсказаний строятся численные модели, которые дают конкретную реализацию распределения материи в некотором модельном

объеме — кубе численной модели. Расчет такой модели — сложная вычислительная задача, требующая применения параллельных суперкомпьютеров. Многие из таких расчетов опубликованы в общем доступе, например, Millenium, MultiDark.

Известно, что темной материи в нашей Вселенной в несколько раз больше по массе, чем видимой. Поэтому галактики образуются там, где образовалось гравитационно-связанное скопление из темной материи — гало. Численное моделирование образования галактик из обычной материи — крайне сложная и до конца не решенная задача, поэтому моделируется, как правило, только эволюция темной материи (она подвержена действию одной лишь силы гравитации). В общедоступных базах данных представлены каталоги гало для примерно сотни срезов по времени. Для каждого гало приводятся координаты, масса, скорость и другие характеристики. Для построения модели ИК фона необходимо каждому гало присвоить инфракрасную светимость.

В свое время такая же задача решалась для моделирования излучения галактик в видимом диапазоне, иными словами — для присвоения гало массы содержащихся в нем звезд. Самая простая идея — поставить знак пропорциональности между звездной массой (или светимостью) и массой темного гало. Однако такая модель сильно противоречит наблюдательным данным. В частности, самые массивные темные гало с массой 10^{14} – $10^{15} M_{\odot}$ содержат в себе не отдельные галактики, а скопления галактик. Имеется механизм, который подавляет образование звезд в массивных гало. Считается, что это происходит за счет активности центральной сверхмассивной черной дыры, которая нагревает газ и тем самым не дает образоваться новым звездам.

С другой стороны, в гало малых масс взрывы сверхновых способны выбросить значительную часть газа во внегалактическое пространство, также снизив скорость звездообразования. Поэтому зависимость звездной массы от массы гало имеет колоколообразную форму. Детальные гидродинамические численные модели образования отдельных галактик предсказывают хорошую корреляцию между светимостью и массой темного гало.

Пыль производится звездами, поэтому логично предположить, что для ИК светимости вид формулы для связи светимости с массой можно использовать такой же, как и для звезд. Важная особенность пыли в том, что она разрушается со временем, поэтому высокая ИК светимость должна сохраняться какое-то время после вспышки звезд.

дообразования, а потом спадать. Именно по этой причине большинство галактик в современную эпоху не относятся к субмиллиметровым.

Чтобы превратить гало из численной модели в субмиллиметровые галактики, необходимо присвоить каждому гало время с момента вспышки звездообразования и скорость спадания ИК светимости. Для этого мы опробовали два подхода. По современным представлениям слияния галактик вызывают вспышки звездообразования, а для гало в общедоступных каталогах приводится время с момента слияния с сопоставимым по массе объектом. В первом варианте модели мы будем считать время с момента слияния временем с момента вспышки звездообразования. Во втором варианте можно ввести в формулу масса—светимость явную зависимость от красного смещения. В данной лекции мы используем только первый подход, второй применялся в нашей работе [5].

Мы использовали вид соотношения масса—светимость из работы [6] с некоторыми модификациями:

$$L(M, z) = L_0 \exp \left(-\frac{(\log(M) - \log(M_0))^2}{2\sigma_L^2} \right) \max \left(1, \frac{t_0}{t_m} \right), \quad (1)$$

где $\log(M_0) = 12.4$; $\sigma_L^2 = 0.12$; $t_0 = 600$ млн лет; $L_0 = 4.2 \times 10^{10} L_\odot$ для интегральной светимости в диапазоне от 8 до 1 000 мкм в системе отсчета галактики; t_m — время с момента слияния гало.

Кроме соотношения масса—светимость мы еще учли гравитационное линзирование галактик друг на друге. Для этого мы отбирали близкие по углу пары галактик и вычисляли коэффициент усиления для более далекой галактики в паре. Подробно это описано в нашей работе [5]. Данный эффект несколько увеличивает количество ярких источников.

Определение модельных параметров и построение карты

Наша модель имеет четыре свободных параметра: L_0 , M_0 , σ_L и t_0 . Для определения их значений мы подгоняли подсчеты галактик ($\log N - \log S$) из работы [2]. Для подгонки использовался генетический алгоритм, так как для каждой итерации подгонки необходимо создать модельный каталог галактик, что требует некоторых вычислительных ресурсов.

Используемый нами исходный каталог содержит около миллиона гало с массами от 3×10^{10} до $3 \times 10^{14} M_{\odot}$. Наиболее массивные гало, соответствующие скоплениям галактик, содержат внутри себя большое количество гало-спутников, которые должны представлять отдельные галактики в скоплении. Мы используем и эти гало-спутники.

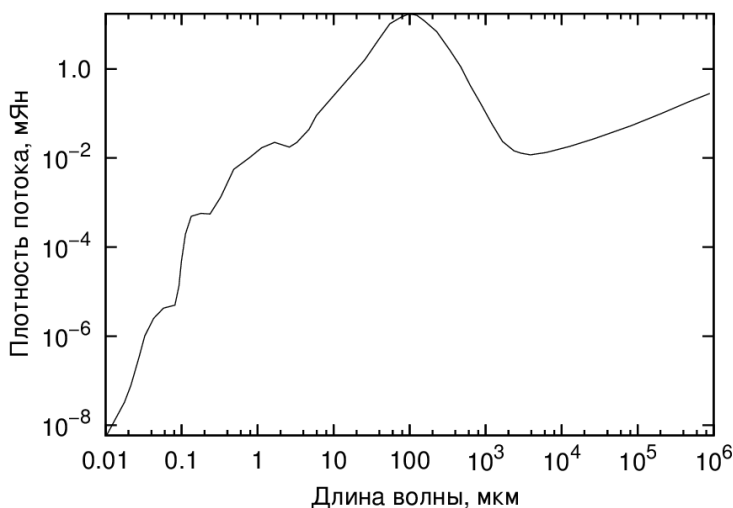


Рис. 2. Типичный спектр субмиллиметровой галактики

В модельном каталоге галактик имеется информация об интегральной ИК светимости каждой галактики, о расстоянии до нее и ее красном смещении. Для вычисления потока от каждой галактики на конкретной длине волны необходимо также иметь спектры. Мы для простоты считаем, что спектры всех галактик имеют в дальнем ИК диапазоне одинаковую форму, такую же, как на рис. 2. Детальные расчеты, например в работе [7], дают серию спектров для галактик с разной интенсивностью звездообразования. Однако спектр пылевой части в первом приближении в этих моделях отличается только амплитудой и небольшим сдвигом. За амплитуду спектра в нашей модели отвечает уравнение (1), а сдвигом мы пренебрегаем. Если спектральное распределение энергии галактики дается функцией $f(\lambda)$ (в единицах Вт/Гц), где λ — длина волны наблюдения, то

поток от галактики определяется как

$$F = f \left(\frac{\lambda}{1+z} \right) \frac{1+z}{4\pi d_L^2}, \quad (2)$$

где d_L — космологическое расстояние по светимости; z — красное смещение.

Следующим шагом является построение карты, т. е. переход от трехмерных координат и потоков для галактик к яркости на двумерной сетке из пикселей. Чтобы сделать такой переход, мы используем интерполяцию «облако в ячейке» (англ. Cloud-in-Cell, CiC). Пусть $x_{i,j}$, $y_{i,j}$ — координаты правого верхнего края пикселя i, j , в который попадает галактика; X, Y — координаты галактики на небе (мы считаем ее точечным источником). Тогда галактика с потоком F дает вклад в интенсивность четырех ближайших пикселей:

$$\begin{aligned} I(i, j) &= F \cdot (X - x_{i,j})/dx (Y - y_{i,j})/dy / A, \\ I(i+1, j) &= F \cdot (1 - (X - x_{i,j})/dx) (Y - y_{i,j})/dy / A, \\ I(i, j+1) &= F \cdot (X - x_{i,j})/dx (1 - (Y - y_{i,j})/dy) / A, \\ I(i+1, j+1) &= F \cdot (1 - (X - x_{i,j})/dx) (1 - (Y - y_{i,j})/dy) / A, \end{aligned} \quad (3)$$

где dx, dy — размеры пикселя; $A = dx dy$ — его площадь. Получаемая величина имеет размерность интенсивности, в астрономии часто используется размерность Ян/стерадиан. Способ интерполяции CiC сохраняет некоторую информацию о положении галактики внутри пикселя, в отличие от простейшего способа, при котором весь поток от галактики попадает в один пиксель.

Для моделирования наблюдений необходимо свернуть полученную карту с диаграммой направленности телескопа. Для телескопа с диаметром апертуры D и идеальным дифракционным качеством изображения диаграмма направленности будет представлять собой функцию Эйри. Однако для упрощения и ускорения вычислений можно заменить ее двумерной функцией Гаусса с параметром $\sigma = 0.42\lambda/D$. Участок полученной карты показан на рис. 3.

Проблема путаницы и выделение точечных источников

Автоматический поиск точечных источников на изображениях — одна из часто решаемых задач в астрономии. Однако, если источников на изображении слишком много, их выделение становится про-

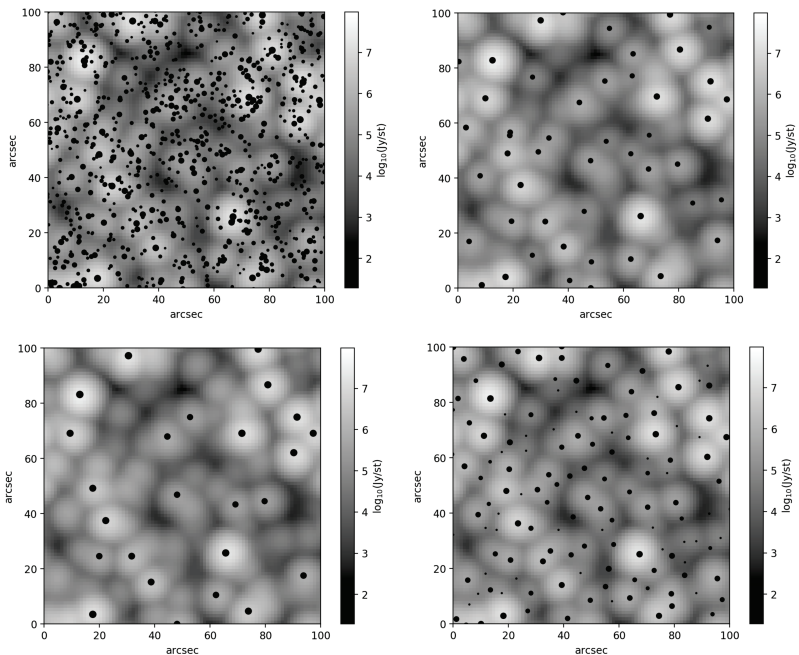


Рис. 3. Один и тот же участок модельной карты на 300 мкм для телескопа диаметром 10 м. Точками показаны источники, размер пропорционален логарифму потока. Левое верхнее изображение: заложенные в модель источники; правое верхнее: выделено с помощью метода локальных максимумов; левое нижнее: алгоритм SEXTRACTOR; правое нижнее: алгоритм getsources 100+300 мкм

блематичным. Обычно возможно выделить источники ярче некоторого предельного потока, так как число ярких источников всегда меньше, чем более тусклых. Этот предел называют пределом путаницы. Для его определения существуют несколько методов. Как уже говорилось ранее, его можно оценить из диаграммы $\log N - \log S$. Площадь диаграммы направленности телескопа можно оценить как $(\lambda/D)^2$. Считается, что источники можно надежно разделять, если на одну диаграмму направленности в среднем приходится 0.1 источника. Таким образом можно найти предельное значение N числа объектов на единицу площади, а из нее по диаграмме $\log N - \log S$ уже определить предельный поток S_{lim} .

Для получения более точного ответа мы взяли модельную карту обзора неба и попробовали выделить на ней источники несколькими методами. А именно, 1) с помощью метода поиска локальных максимумов; 2) SEXTRACTOR [8]; 3) getsources [9, 10].

Алгоритм поиска локальных максимумов годится исключительно для модельных изображений, свободных от шума приемника, поскольку для поиска максимумов используются производные от интенсивности. Численное взятие второй производной приводит к значительному росту ошибок, если таковые имеются. Тем не менее данный алгоритм работает сравнимо с выделением источников глазом на данной карте.

SEXTRACTOR представляет собой программу для выделения источников произвольной формы, не только точечных. Сначала он попиксельно разбивает изображение на фон и источники, а затем те пиксели, которые не относятся к фону, разделяются на отдельные источники. Данный алгоритм не очень хорошо работает в случае серьезной путаницы, что и демонстрирует наша попытка проанализировать им модельные карты на рис. 3.

Алгоритм, заложенный в getsources, наоборот, рассчитан на обработку данных со значительным эффектом путаницы. Он применялся для анализа многих изображений, полученных в дальнем ИК диапазоне на телескопе им. Гершеля. Кроме того, getsources может одновременно анализировать изображения одного и того же участка неба в нескольких диапазонах. На более коротких длинах волн, где угловое разрешение выше, можно разделить большинство источников, а затем можно использовать информацию об их координатах для анализа изображений на более длинных волнах, где эти источники уже сливаются друг с другом. С помощью модельных карт мы протестировали данную возможность.

Для измерения качества работы алгоритмов мы строим зависимость числа найденных источников от потока ($\log N - \log S$) и находим поток, на котором число источников падает в два раза по сравнению с заложенным в модель. Иными словами, мы определяем уровень, на котором алгоритм находит половину от всех источников. В таблице мы приводим эту характеристику для трех алгоритмов на длине волны 300 мкм. Как видно, оценка дает неплохую точность, а применение getsources к многодиапазонным изображениям действительно позволяет в несколько раз понизить предел путаницы.

Предел путаницы для длины волны 300 мкм и диаметра зеркала телескопов им. Гершеля (3.5 м) и Миллиметрон (10 м)

Алгоритм	Для Гершеля, мЯн	Для Миллиметрона, мЯн
Оценка по $\log N - \log S$	9	0.7
Поиск максимумов	9	0.6
SEXTRACTOR	80	12
getsources 300 мкм	14	0.7
getsources 100+300 мкм	3	0.1

Заключение. Особенности реализации модели

В данной лекции продемонстрированы шаги, необходимые для создания искусственного каталога галактик на основе космологических численных моделей и проведен анализ проблемы путаницы на полученных модельных картах. Показано, что простая оценка дает неплохое приближение для предела путаницы на длине волны 300 мкм. Также продемонстрирована зависимость предела путаницы от диаметра телескопа.

Для получения каталога гало мы использовали сайт <http://cosmosim.org> и скачали оттуда данные модели SmallMultiDark Planck. Также эти данные имеются на сайте <http://skiesanduniverses.iaa.es/>. Для преобразования отдельных срезов по времени в конус модельного обзора мы написали свой код на Fortran-90. Общедоступных кодов для подобного преобразования мы не нашли.

Дальнейший анализ выполнялся на языке программирования Python 2.7. Подгонка модельных параметров генетическим алгоритмом доступна в пакете `scipy.optimize.differential_evolution`. Реализация C/C++ возможна и на Python, но для ускорения мы использовали код на языке Си, включаемый в программу на Python с помощью пакета `weave`. Для выполнения свертки модельной карты с диаграммой направленности использовался пакет `astropy.convolution`.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 16-02-01043.

Библиографические ссылки

1. *Planck Collaboration, Ade P. A. R., Aghanim N. et al.* Planck early results. XIX. All-sky temperature and dust optical depth from Planck and

- IRAS. Constraints on the “dark gas” in our Galaxy // *Astron. Astrophys.* — 2011. — Vol. 536. — P. A19. 1101.2029.
2. *Béthermin M., Daddi E., Magdis G. et al.* A Unified Empirical Model for Infrared Galaxy Counts Based on the Observed Physical Evolution of Distant Galaxies // *Astrophys. J. Lett.* — 2012. — Vol. 757. — P. L23. 1208.6512.
 3. *Planck Collaboration, Ade P. A. R., Aghanim N. et al.* Planck early results. XVIII. The power spectrum of cosmic infrared background anisotropies // *Astron. Astrophys.* — 2011. — Vol. 536. — P. A18. 1101.2028.
 4. *Viero M. P., Wang L., Zemcov M. et al.* HerMES: Cosmic Infrared Background Anisotropies and the Clustering of Dusty Star-forming Galaxies // *Astrophys. J.* — 2013. — Vol. 772. — P. 77. 1208.5049.
 5. *Pilipenko S. V., Tkachev M. V., Ermash A. A. et al.* A model of the cosmic infrared background produced by distant galaxies // *Astronomy Letters.* — 2017. — Vol. 43. — P. 644–655. 1710.06665.
 6. *Shang C., Haiman Z., Knox L., Oh S. P.* Improved models for cosmic infrared background anisotropies: new constraints on the infrared galaxy population // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* — 2012. — Vol. 421. — P. 2832–2845. 1109.1522.
 7. *Chary R., Elbaz D.* Interpreting the Cosmic Infrared Background: Constraints on the Evolution of the Dust-enshrouded Star Formation Rate // *Astrophys. J.* — 2001. — Vol. 556. — P. 562–581. astro-ph/0103067.
 8. *Bertin E., Arnouts S.* SExtractor: Software for source extraction. // *Astron. and Astrophys. Suppl. Ser.* — 1996. — Vol. 117. — P. 393–404.
 9. *Men'shchikov A., André P., Didelon P. et al.* A multi-scale, multi-wavelength source extraction method: getsources // *Astron. Astrophys.* — 2012. — Vol. 542. — P. A81. 1204.4508.
 10. *Men'shchikov A.* A multi-scale filament extraction method: getfilaments // *Astron. Astrophys.* — 2013. — Vol. 560. — P. A63. 1309.2170.